

**М. М. ГРИШИН, Б. П. ЗАЙЦЕВ, О. К. МОРАЧКОВСЬКИЙ, Ю. Г. ПАЩЕНКО, О. Г. КАНТОР**

**ОЦІНКА ДИНАМІЧНОЇ МІЦНОСТІ ВАЛОПРОВОДУ ЗІ ЗВАРНИМИ РОТОРАМИ  
ЦИЛІНДРІВ НИЗЬКОГО ТИСКУ ТУРБИНИ К-220-44-1**

Надані розрахунки критичних частот обертання і міцності при короткому замиканні в генераторі валопроводу зі зварними роторами циліндрів низького тиску модернізованого турбоагрегату К-220-44-1. Розрахунки виконані із застосуванням програмних пакетів, розроблених в ІПМаш НАН України, АТ «Турбоатом». Результати розрахунків вказують на відповідність міцності валопроводу вимогам нормативної документації.

**Ключові слова:** міцність, турбоагрегат, згинне колювання, коротке замикання, валопровод, зварні ротори, модернізація.

**Н. Н. ГРИШИН, Б. Ф. ЗАЙЦЕВ, О. К. МОРАЧКОВСКИЙ, Ю. Г. ПАЩЕНКО, А. Г. КАНТОР**  
**ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ВАЛОПРОВОДА СО СВАРНЫМИ РОТОРАМИ  
ЦИЛИНДРОВ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ТУРБИНЫ К-220-44-1**

Представлены результаты расчетного анализа критических частот вращения и прочности при коротком замыкании в генераторе валопровода со сварными роторами цилиндров низкого давления модернизированного турбоагрегата К-220-44-1. Расчеты выполнены с применением программных пакетов, разработанных в ИПМаш НАН Украины, АО «Турбоатом». Результаты расчетов указывают на соответствие прочности валопровода требованиям нормативной документации.

**Ключевые слова:** прочность, турбоагрегат, изгибные колебания, короткое замыкание, валопровод, сварные роторы, модернизация.

**М. HRYSHYN, B. ZAYTSEV, O. MORACHKOVSKYY, YU. PASHCHENKO, O. KANTOR**  
**A EVALUATION OF THE DYNAMIC STRENGTH OF THE SHAFT LINE WITH WELDED  
ROTORS OF LOW PRESSURE CYLINDERS OF THE K-220-44-1 TURBINE**

To assess the danger of resonance vibrations, the calculations data of the critical rotational speeds and strength in case of a sudden short circuit in the generator of the shaft line of the upgraded K-220-44-1 turbine unit have been presented. The turbine unit comprising a high-pressure cylinder and two low-pressure cylinders has been in operation at nuclear power plants since the early 1970s. The shaft-line consists of a high-pressure all-forged rotor, two low-pressure welded rotors, an intermediate part and a generator rotor. For the rotors of the turbine unit constituting the shafting, rod models with concentrated masses and elastic-damping support were used. Recommendations on the choice of vertical compliance of supports for computational studies are given. Estimates of the critical speeds of the shafting are obtained without taking into account the lubricant layer of the support bearings. The dynamic state of the shafting is considered for two-phase and three-phase short circuits in the generator. The maximum twisting moments in the rotors' necks under the support bearings are estimated, and the safety factors for the limiting table torque in the plasticity state are determined. The calculations were performed using software packages developed in the A. Podgorny Institute of Mechanical Engineering Problems of NASU, Joint Stock Corporation "Turboatom". The calculation data show that no dangerous resonance vibrations of the shaft-line of the upgraded K-220-44-1 turbine unit are detected and the strength of the shaft-line in case of a sudden short circuit in the generator is in conformity with the requirements of regulatory and technical documents.

**Key words:** strength, turbine unit, bending vibrations, short circuit, shaft line, welded rotors, upgrade.

**Вступ**

Протягом останнього десятиріччя виконано модернізацію значної частини турбоагрегатів потужністю 200–1000 МВт виробництва АТ «Турбоатом», які експлуатуються на АЕС з початку 70-х років минулого сторіччя. В теперішній час модернізуються турбіни потужністю 220 МВт, що введені в експлуатацію у період 1980–1987 років. Так, в 2018 році АТ «Турбоатом» виконало роботи з модернізації проточних частин турбін К-220-44-1 потужністю 220 МВт, що експлуатуються на АЕС «Пакш», блок 1, Угорщина (виконано модернізацію проточних частин циліндрів високого тиску (ЦВТ), модернізацію проточних частин циліндрів низького тиску (ЦНТ) виконано раніше) та АЕС Арменії, блок 2 (виконується модернізація проточних частин ЦВТ й ЦНТ). Планується подібну модернізацію ЦВТ блоків 1, 2 і ЦНТ блока 2 виконати на Рівненській АЕС, Україна.

**Мета роботи**

Мета роботи – визначення критичних швидкостей та амплітуд крутильних коливань при раптовому короткому замиканні в генераторі валопроводу модернізованої турбіни К-220-44-1 та оцінка запасів динамічної міцності.

**Розрахункові моделі  
та результати досліджень**

В основу модернізації турбоагрегату покладено технічні рішення, які пройшли апробацію в проточних частинах та в зварних роторах парових турбін нового покоління потужністю 300–330 МВт виробництва АТ «Турбоатом», що експлуатуються на теплових електростанціях України та за кордоном [1, 2].

В результаті модернізації замінюються проточні частини високого й низького тиску із замі-

© М. М. Гришин, Б. П. Зайцев, О. К. Морачковський, Ю. Г. Пашченко, О. Г. Кантор, 2019

ною валопроводів турбін. Для підтвердження надійної роботи обладнання після модернізації виконано комплекс розрахункових робіт з оцінки динаміки нових роторів, система яких з роторами генераторів і складає валопроводи турбоагрегатів.

Забезпечення експлуатаційної надійності роторів є складною задачею внаслідок виключно важких умов їхньої роботи. Ротори турбін знаходяться під дією навантаження від лопаткового апарата, відчувають значні крутні зусилля, працюють в умовах мало- та багатоциклових навантажень при вібрації й крутильних коливаннях. Виходячи з цих умов і досвіду проектування, виробництва та експлуатації визначено основні фактори, що зумовлюють надійність роторів. Одним із основних факторів, що визначає показники надійності валопроводу турбоагрегату на етапі його проектування, є розрахунок динаміки роторів, який містить в собі розрахунки вільних й вимушених згинних усталених коливань, критичних швидкостей обертання роторів, розрахунки крутильних коливань валопровода при коротких замиканнях в генераторі.

Для проведення розрахунків роторів турбін на етапі їхнього проектування, доводки та модернізації створено як оригінальні проблемно-орієнтовані програмні розробки в ІПМаш ім. А. М. Підгорного НАН України, БАТ «НВО ЦКТІ», що орієнтовані на нормативні документи [3–5], так і універсальні програмні комплекси, що розповсюджені на міжнародному ринку програмних продуктів, наприклад *ANSYS*, *COSMOS* тощо. Результати розрахункових досліджень використані при модернізації у вигляді рекомендацій та висновків з підвищення конструктивної міцності валопроводів турбін виробництва АТ «Турбоатом» та впроваджені на підприємстві за безпосередньою участю авторів статті. Розрахункові дослідження виконано із застосуванням програмних пакетів, які створені в ІПМаш ім. А. М. Підгорного НАН України, АТ «Турбоатом» та БАТ «НВО ЦКТІ».

Розрахунки вільних і вимушених згинних усталених коливань роторів виконано для динамі-

чних моделей у вигляді багатопрогонових стержневих систем зі змінними по прогонах масою й жорсткістю, в яких опорні вузли, диски, зовнішні зосереджені сили і моменти, аеродинамічні сили ротора віднесені до границь прогонів. Зовнішнє моногармонічне навантаження приймається заданим у вигляді прикладених до ротора сил та моментів.

Для оцінки небезпеки резонансних коливань виконано серію розрахунків критичних швидкостей обертання валопроводу модернізованого турбоагрегату К-220-44-1 на жорстких та податливих опорах, без урахування масляного шару опорних підшипників.

Валопровід турбоагрегату складається з ціліснокованого ротора циліндра високого тиску, двох зварних роторів циліндрів низького тиску, промчастини та ротора генератора. Ротори та промчастина з'єднані між собою жорсткими муфтами. Кожний ротор спирається на два підшипники. Ротор ЦВТ – однопоточний, який несе після модернізації сім рядів робочих лопаток з цільнофрезерованими бандажами. При модернізації на роторі встановлено робочі лопатки нової конструкції. Зварні ротори ЦНТ – двохпоточні, де в кожному потоці встановлено по п'ять рядів робочих лопаток нової конструкції.

Валопровід замінюється невагомою балкою на пружно-демпферних опорах, на якій розташовані зосереджені маси, як представлено на рис. 1. В розрахунку використано безрозмірні коефіцієнти жорсткості й демпфірування, які розраховано за розробленою програмою. Границі розрахункових ділянок розташовані на опорах та в місцях зміни діаметра роторів. Вихідні дані по турбінах, включаючи лінійні розміри, маси, приведені осьові моменти інерції та згинні жорсткості розрахункових ділянок підготовлено за допомогою спеціально розробленої авторами роботи комп'ютерної програми. Особливі вимоги при визначенні жорсткостей (податливостей) ділянок роторів на згин, слід віднести до ділянок з дисками зварних роторів. Дані по генератору ТГВ-200 представлені ПАТ «Силові машини–Електросила».

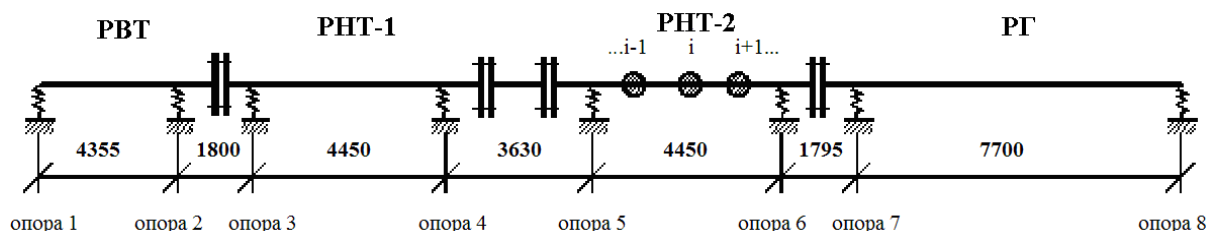


Рис. 1 – Розрахункова схема валопроводу модернізованого турбоагрегату К-220-44-1:

РВТ – ротор високого тиску; РНТ – ротор низького тиску; РГ – ротор генератора

Зауважимо, що при браку експериментальних даних з динамічних податливостей опор, можна рекомендувати для розрахунків значення вертика-

льних податливостей опор в діапазоні  $(2-8) \cdot 10^{-10}$  м/Н (для турбогенераторів зі швидкістю

обертання валопроводу 3000 об/хв.). Такі рекомендації ґрунтуються на досвіді проектування й експлуатації турбоагрегатів.

Результати розрахунків критичних частот обертання без урахування мастильного шару опорних підшипників, які представлено на рис. 2–5, вказують на відсутність небезпечних резонансних коливань валопроводів модернізованих турбоагрегатів К-220-44-1. Перевірочні розрахунки, за необхідності, виконуються після уточнення даних з податливостей опор.

Суттєвими є напруження кручення в валопроводі від крутильного моменту. Напруження кручення перевіряють як для номінального, так і для аварійного, що спричинений раптовим коротким замиканням в генераторі, режимів роботи.

В статті розглянуті питання аварійного режиму роботи роторів при раптовому короткому замиканні, що призводить до появи зовнішнього змінного електромагнітного крутильного моменту  $M_{кз}^0$ , який діє на ротор генератора та спричиняє крутильні коливання валопроводу. Розглянуто два види короткого замикання в генераторі – двофазне й трифазне. Відповідно цим випадкам приймалися в розрахунках наступні вирази для моменту  $M_{кз}^0$

$$M_{кз}^0 = M_n (\alpha_0 + \alpha_1 \sin \omega t + \alpha_2 \sin 2\omega t) \quad (1)$$

для двофазного та

$$M_{кз}^0 = M_n (\alpha_0 + \alpha_1 \sin \omega t) \quad (2)$$

для трифазного коротких замикань, де  $\omega$  – частота коливань, яка дорівнює 314 рад/с при частоті електричної мережі 50 Гц;

$M_n$  – номінальний крутильний момент;

$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$  – безрозмірні коефіцієнти, які підлягають конкретизації для обчислень.

Крутильні коливання валопроводу системи визначаються значеннями моменту інерції мас відносно осі ділянок вала  $J_i$  та крутильною податливістю  $e_i = \frac{l_i}{G_i I_i^p}$  ділянок валопроводу з жорсткі-

стю перерізу на кручення  $c_i = G_i I_i^p$ .

Розрахунки валопроводів турбоагрегатів на раптове коротке замикання виконані з використанням програмної розробки ІПМаш НАН України. Вихідні дані для розрахунків, до яких входили масово-інерційні характеристики ділянок роторів з робочими лопатками постійного та змінного перерізу, крутильні податливості ділянок, отримані авторами за спеціально розробленою програмою.

Система роторів турбіни та генератора складає валопровід складної форми. Еквівалентна їй система представлялась пружним невагомим валопроводом, до якого входять зосереджені маси, як показано на рис. 6.

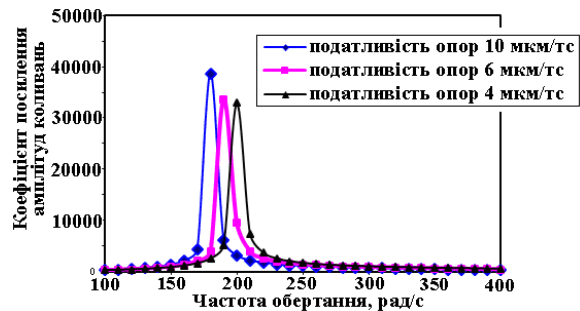


Рис. 2 – Коефіцієнти посилення амплітуд коливань (умовні) середини прогину РВТ

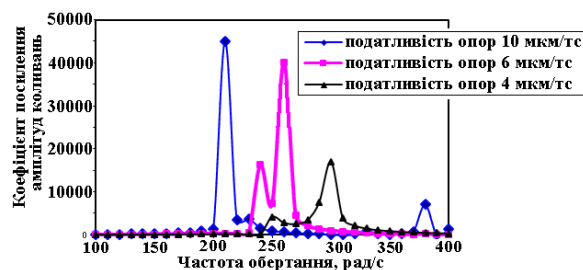


Рис. 3 – Коефіцієнти посилення амплітуд коливань (умовні) середини прогину РНТ-1

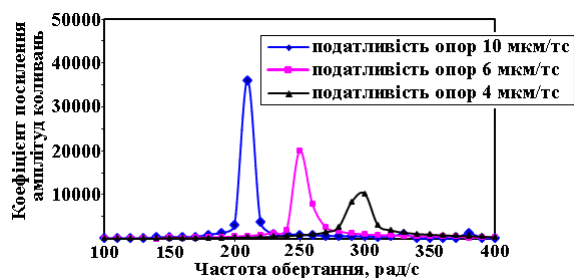


Рис. 4 – Коефіцієнти посилення амплітуд коливань (умовні) середини прогину РНТ-2

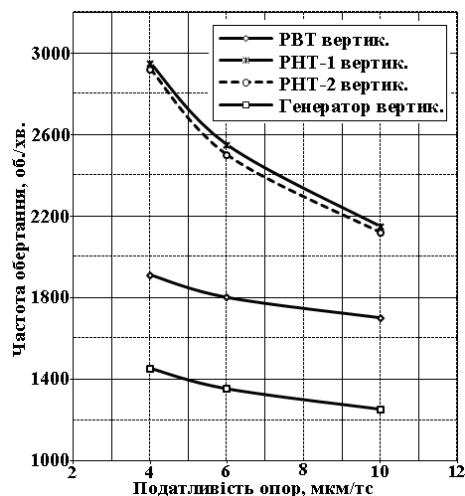


Рис. 5 – Залежність критичних швидкостей обертання валопроводу від податливостей опор турбоагрегату

Відповідно до прийнятих законів (1), (2) момент раптового короткого замикання генератора складається з постійної складової та змінних гармонік, що спричиняє появу змінних напружень кручення в валопроводі, які виникають при крутильних коливаннях.

Сумарний момент скручування валопроводу складається із номінального моменту та динамічних моментів, які виникають при крутильних коливаннях

$$M_{\text{кз}} = M_{\text{н}} + M_{\text{кз}}^0. \quad (3)$$

При визначенні запасів міцності в найбільш навантажених перерізах шийок роторів в розрахунках використано значення сумарного моменту.

На рис. 7 для модернізованої турбіни К-220-44-1 наведено розрахункові дані про зміну в часі

крутильних моментів в характерних, найбільш навантажених ділянках з боку генератора перерізах валопроводів – шийках роторів під опорні підшипники.

Запаси міцності  $n_T$  по границі текучості матеріалу на зріз з використанням критерію максимальних дотичних напружень визначено для максимального режиму при крученні від крутильного моменту, що передається роторами.

В результаті розрахунків запасів міцності встановлено наступне: для модернізованого турбоагрегату К-220-44-1  $n_T \approx 11$  та  $n_T \approx 7$  відповідно для шийок підшипників  $\varnothing 420$  боків регулятора та генератора РНТ-1,  $n_T \approx 7$  – для шийки підшипника  $\varnothing 420$  РНТ-2 бік регулятора та  $n_T \approx 10$  – для шийки підшипника  $\varnothing 520$  РНД-2 бік генератора.

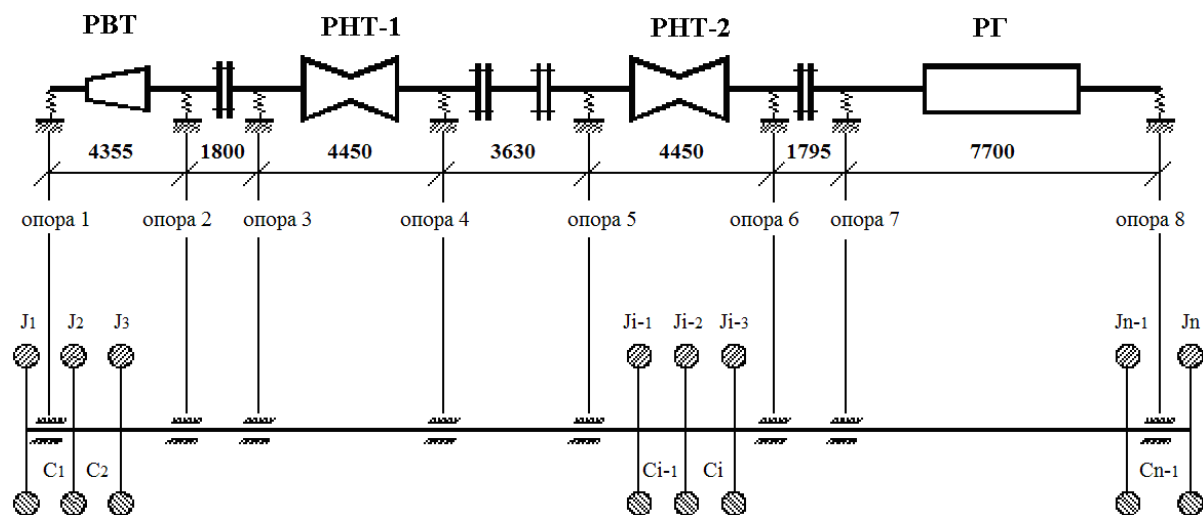


Рис. 6 – Розрахункова схема валопроводу модернізованого турбоагрегату К-220-44-1: позначення див. рис. 1

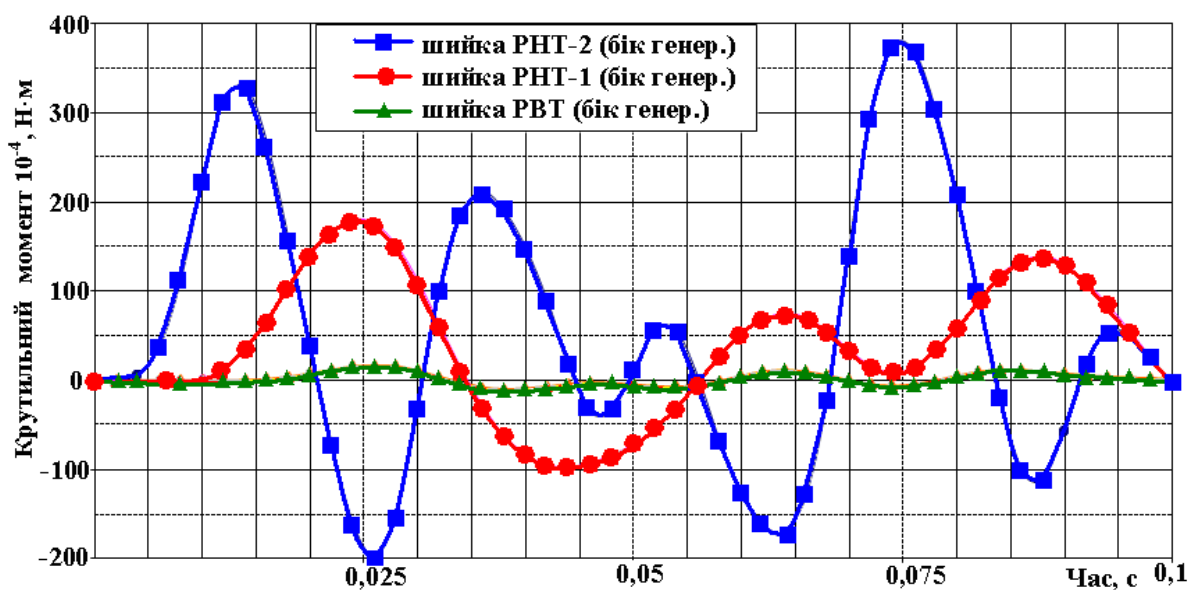


Рис. 7 – Зміна в часі крутильного моменту в характерних перерізах валопроводу (без  $M_{\text{н}}$ )

## Висновки

Побудовано розрахункові моделі валопроводу на податливих опорах модернізованого турбоагрегату К-220-44-1, який експлуатується на атомних станціях, для визначення критичних частот обертання та оцінки динамічної міцності при раптовому короткому замиканні в генераторі. Отримано розрахункові дані критичних частот обертання валопроводу та динамічних крутильних моментів при короткому замиканні в генераторі. Результати розрахунків вказують на відсутність небезпечних резонансних коливань валопроводу та на відповідність динамічної міцності валопроводу при раптовому короткому замиканні в генераторі вимогам нормативно-технічної документації. Це дозволяє зробити висновок про забезпечення конструктивної міцності валопроводу при його подальшій експлуатації після модернізації.

## Список літератури

1. Суботін В. Г., Левченко Є. В., Швецов В. Л., Шубенко О. Л., Тарелін А. О., Суботович В. П., Туранов Г. Ю., Нагорський О. М., Данилюк І. П., Борисов М. А. *Створення парових турбін нового покоління потужністю 325 МВт*. Харків: Фолио, 2009. 256 с.
2. Суботин В. Г. Левченко Е. В., Швецов В. Л., Галацан В. Н., Кожешкурт И. И. Повышение эффективности турбинных установок тепловых электростанций. *Теплоэнергетика*. 2009. № 9. С. 50–54.
3. Всесоюзный НИИ по нормализации в машиностроении. *Расчеты и испытания на прочность. Методы и алгоритмы расчета на ЭВМ свободных и вынужденных колебаний многопролетных роторов на упруго-демпферных опорах. Методические рекомендации МР 220-87*. ИПМаш АН УССР. Москва: ВНИИНАШ, 1987. 62 с.
4. Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического машиностроения им. И.И.Ползунова. *Агрегаты паротурбинные и газотурбинные. Расчет критических частот валопровода. Руководящий технический материал РТМ 108.020.21-83*. Ленинград: НПО ЦКТИ, 1983. 28 с.
5. Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического машиностроения им. И.И.Ползунова. *Расчет валопровода турбоагрегата на внезапное короткое замыкание. Руководящий технический*

материал РТМ 108.021.13-83. Ленинград: НПО ЦКТИ, 1984. 31 с.

## References (transliterated)

1. Subotin V. G., Levchenko Ye. V., Shvetsov V. L., Shubenko O. L., Tarelin A. O., Subotovych V. P., Turanov H. Yu., Nahorsky O. M., Danylyuk I. P., Borysov M. A. (2009), *Stvorenniya parovykh turbin novoho pokolinnya potuzhnistyu 325 MVt* [Development of 325 MW New Generation Steam Turbines], Folio, Kharkiv, Ukraine.
2. Subotin V. G., Levchenko Ye. V., Shvetsov V. L., Galatsan V. N., Kozheshkurt I. I. (2009), "Povyshenie effektivnosti turbinnnykh ustanovok teplovykh elektrostantsiy [Improving the Efficiency of Turbine Units of Thermal Power Plants]", *Teploenergetika* [Power system], no. 9, pp. 50–54.
3. (1987), *Vsesoyuznyy NII po normalizatsii v mashinostroenii. Raschety i ispytaniya na prochnost'. Metody i algoritmy rascheta na EVM svobodnykh i vynuzhdennykh kolebaniy mnogoproletnykh rotorov na uprugо-dempfernykh oporakh. Metodicheskie rekomendatsii МР 220-87*. IPMash AN USSR [All-Union Research Institute for Normalization in Machine Building. Calculations and strength tests. Methods and algorithms for calculating the free and forced vibrations of multi-span rotors on elastic-damper supports using a computer. Methodical recommendations МР 220-87. IPMash of the NAS of Ukraine], VNIINMASH, Moscow, USSR.
4. (1983), *Nauchno-proizvodstvennoe ob"edinenie po issledovaniyu i proektirovaniyu energeticheskogo mashinostroeniya im. I. I. Polzunova. Agregaty paroturbinnye i gazoturbinnye. Raschet kriticheskikh chastot valoprovoda. Rukovodnyashchiy tekhnicheskii material RТМ 108.020.21-83* [I. I. Polzunov Scientific and Production Association for Research and Design of Power Engineering Equipment. Steam- and gas-turbine units. Calculation of the critical frequencies of the shaft-line. Technical Guidelines RТМ 108.020.21-83], NPO CKTI, [Scientific Production Association Central Kotloturbin Institute], Leningrad, USSR.
5. (1984), *Nauchno-proizvodstvennoe ob"edinenie po issledovaniyu i proektirovaniyu energeticheskogo mashinostroeniya im. I. I. Polzunova. Raschet valoprovoda turboagregata na vnezapnoe korotkoe zamykanie. Rukovodnyashchiy tekhnicheskii material RТМ 108.021.13-83* [I. I. Polzunov Scientific and Production Association for Research and Design of Power Engineering Equipment. Calculation of the shaft-line of the turbine unit for a sudden short circuit. Technical Guidelines RТМ 108.021.13-83], NPO CKTI, [Scientific Production Association Central Kotloturbin Institute], Leningrad, USSR.

Надійшла (received) 20.01.2019

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Гришин Микола Миколайович (Гришин Николай Николаевич, Hryshyn Mykola)** – кандидат технічних наук, перший заступник головного конструктора парових турбін, Акціонерне товариство «Турбоатом», м. Харків, Україна, e-mail: shvetsov@turboatom.com.ua.

**Зайцев Борис Пилипович (Зайцев Борис Филиппович, Zaytsev Borys)** – доктор технічних наук, провідний науковий співробітник, Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, м. Харків, Україна, e-mail: b.zajtsev@gmail.com.

**Морачковський Олег Костянтинович (Морачковский Олег Константинович, Morachkovskyy Oleg)** – доктор технічних наук, завідувач кафедри, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: morachko@kpi.kharkov.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5466-5110>.

**Пащенко Юрій Григорович (Пащенко Юрий Григорьевич, Paschenko Yuriy)** – заступник головного інженера – головний технолог, Акціонерне товариство «Турбоатом», м. Харків, Україна, e-mail: shvetsov@turboatom.com.ua

**Кантор Олександр Геннадійович (Кантор Александр Геннадиевич, Kantor Oleksandr)** – начальник технологічного бюро з розвитку зварювального виробництва, Акціонерне товариство «Турбоатом», м. Харків, Україна, e-mail: shvetsov@turboatom.com.ua.